

瓦斯抽采达标分级评价模型的研究与应用^①

徐婷婷^{②*} 黄 德^{***}

(* 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院 葫芦岛 125100)

(** 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室 葫芦岛 125100)

摘 要 为解决目前瓦斯抽采达标评价体系复杂、人为干扰大等问题,利用投影寻踪(PP)的降维理念将高维指标数据投影到一维子空间,使用遗传算法找到近似最佳投影向量,建立基于遗传算法投影寻踪(GAPP)的瓦斯抽采达标分级评价模型,快速而准确地对瓦斯抽采达标与否进行评价和分级。模型在两个不同矿井分别进行了实际应用和分析,结果表明:利用遗传投影寻踪模型对瓦斯抽采达标评价在能评价出达标等级(分别为Ⅱ级和Ⅲ级)的同时,可用等级值 2 和 3.93 来反映等级程度,评价结果与生产实际相符合,证实了评价模型的精准性和可靠性。

关键词 瓦斯抽采, 瓦斯涌出量, 分级评价, 遗传算法, 投影寻踪(PP)

0 引 言

一直以来,瓦斯灾害事故是煤矿安全生产的最大威胁之一,根据煤矿瓦斯领域的专家及学者对瓦斯事故的探求和研究可知,瓦斯抽放是解决矿井瓦斯问题的有效方法^[1,2]。瓦斯抽采的效果直接影响着矿井煤与瓦斯突出、瓦斯异常涌出、瓦斯爆炸等事故发生的概率,在抽采效果不佳或抽采评价不达标 的情况下仍进行生产,非常容易导致高突矿井瓦斯灾害事故的发生^[3,4]。因此,瓦斯抽采达标评价在防治瓦斯事故中属于相当重要的环节。至今,相关学者对抽采达标评价进行了很多研究,张景立^[5]利用单项和综合指标评价法,以及残余瓦斯含量法分别对采煤工作面在回采之前进行了瓦斯突出危险性的评价,并指出采用穿层钻孔抽采瓦斯,降低突出危险性。孙鑫^[6]等利用模糊层次分析法进行了瓦斯突出影响因素的评价,结果得到地应力、地质构造、煤层瓦斯压力等因素为试验矿井煤与瓦斯突出的主

要影响因素。王彦波^[7]等建立由 16 个评价指标组成的多级 FAHP 评价体系,对矿井瓦斯治理进行从点到面的评价和验证。周福宝^[8]等提出了安全抽采的概念以及瓦斯抽采安全度的定量评价指标,并建立瓦斯抽采安全度对应的计算模型。董贺^[9]等研究了穿层钻孔倾角与瓦斯抽采效果之间的关系,建立了钻孔倾角对瓦斯抽采影响的数学模型,通过钻孔倾角对瓦斯抽采效果进行评价。梁冰^[10]等基于模糊层次法与层次分析发组合建立瓦斯抽采达标评价指标体系,对煤与瓦斯共采系统进行达标评价。申健^[11]等建立了 AHP-FCE 瓦斯抽采达标评价模型,通过评价可分析出评价指标的主导影响作用。董洪凯^[12]针对试验矿井的工作面建立了多因素指标评价体系,为贵州高突瓦斯矿井瓦斯防治提供示范。前人所研究的瓦斯抽采达标评价体系和模型存在人为主观参与分析过多等缺点,对于评价权重的赋值难以做到完全客观评价,研究结果的合理性随权重的合理性而发生变化,从而影响了相关评价的准确性和客观性。

① 国家自然科学基金(51574142)资助项目。
② 女,1989 年生,硕士;研究方向:瓦斯灾害防治理论与技术研究;联系人,E-mail: xutingting0803@126.com
(收稿日期:2018-01-23)

目前,投影寻踪评价方法广泛应用在土壤质量评价^[13]、水质评价^[14]、灌溉节能评价^[15]、台风灾害预测^[16]、电力能效分析^[17]、瓦斯涌出量预测^[18]等领域的评价和预测。投影寻踪的基本思想是将高维矩阵投影到一维或二维空间,找到可以反映原始数据特征的投影,从而实现以低维数据分析原始数据的目的,它具有逼近一般非线性映射和分类能力^[17]。而瓦斯抽采达标评价为多影响因素评价体系,其评价分级过程易受到人为主观因素的影响,基于此,本文建立基于遗传算法投影寻踪 (genetic algorithm based on projection pursuit, GAPP) 的瓦斯抽采达标分级评价模型,其评价过程不受外部任何人和事物的影响,提高瓦斯抽采达标评价的客观性和可靠性。

1 模型建立

1.1 评价指标体系

根据《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》第二十一条规定可知:煤矿瓦斯抽采达标评价分为基础条件评价和瓦斯抽采效果评价两个部分。基础条件评价主要针对煤矿企业瓦斯抽采标准化管理,包括抽采系统稳定性、抽采规划和年度计划的完善性、抽采方法和工艺的合理性、抽采竣工验收材料的真实性、达标自我评价体系和抽采管理制度的完善性、抽采泵站和管网能力、计量测点和器具的标准化、相关测试条件及方法的合理性等 8 项内容,基础条件评价指标 X_1 (%) 依据《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》的第二十二条规定进行分级处理;根据《煤矿瓦斯抽采基本指标》规定,瓦斯抽采效果评价指标包括煤层残余瓦斯含量 X_2 (m^3/t)、煤层残余瓦斯压力 X_3 (MPa)、采煤工作面瓦斯抽采率 X_4 (%)、采煤工作面前方 20m 以上范围内煤的可解吸瓦斯量 X_5 (m^3/t)、采掘工作面风速 X_6 (m/s)、采掘工作面回风流中瓦斯浓度 X_7 (%)、矿井瓦斯抽采率 X_8 (%) 等 7 项内容。

将瓦斯抽采达标标准分为五个级别,分别为 I 级, II 级, III 级, IV 级, V 级,其中 III 级为《煤矿瓦斯抽采达标暂行规定》以及《煤矿瓦斯抽采基本指标》

中对抽采达标的最低要求。建立如表 1 所示的评价指标达标分级标准。

表 1 评价指标和分级标准

评价指标	I	II	III	IV	V
X_1	≥ 95	90	80	70	≤ 60
X_2	≤ 5	7	8	8.5	≥ 10
X_3	≤ 0.1	0.6	0.74	0.8	≥ 1
X_4	≥ 90	85	70	20	< 15
X_5	≤ 2	3	4	8.5	> 8
X_6	≤ 3	5	4	4.2	> 4
X_7	0	0.5	1	1.2	> 2
X_8	≥ 80	0	60	25	≤ 20

1.2 评价分级模型

文献[19-21]指出了国内应用投影寻踪分类法出现的 5 种错误的模型建立,并提出了正确的建模过程和指标属性判别的准则,本文参考了文献[19-21]中的建模方法和准则建立瓦斯抽采达标遗传算法投影寻踪评价分级模型。

设评价样本总数为 m 个;指标总个数为 n 个; $x_{i,j}$ 为第 i 个样本的第 j 个指标归一化处理后的变量值 ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$); $x_{i,j}^*, X_{m,n}^*$ 为 $x_{i,j}, X_{m,n}$ 对应的原始值; α_i 为第 i 个评价指标所对应的权重; $\alpha(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 为单位投影向量。

(1) 数据的归一化处理

定义指标值越大,指标越优为正向指标;指标值越小,指标越优为逆向指标,则对于正向指标和逆向指标的数据预处理方法分别为:

$$x_{i,j} = \frac{x_{i,j}^* - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \tag{1}$$

$$x'_{m,n} = \frac{\max(x_n) - x_{m,n}^*}{\max(x_n) - \min(x_n)} \tag{2}$$

式中, $\max(x_j), \max(x_n)$ 为第 j, n 个指标中对应的最大样本原始值, $\min(x_j), \min(x_n)$ 为第 j, n 个指标中对应的最小样本原始值。

(2) 构造一维投影目标函数

设 $z(i)$ 为第 i 个样本对应的投影值。可按下式进行计算求得:

$$z(i) = \sum_{j=1}^n \alpha_j x_{i,j} \tag{3}$$

设 S_z 为 $z(i)$ 的标准差; D_z 为 $z(i)$ 的局部密度。其值分别按式(4)和式(5)计算求得:

$$S_z = \left(\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (z(i) - E(z))^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (R - r_{i,j}) \cdot u(R - r_{i,j}) \quad (5)$$

式中, $E(z)$ 为 $z(i)$ 的平均值; R 为密度窗宽半径, 根据文献[19]及[21]中证明取: $\max(r_{i,j})/5 \leq R \leq \max(r_{i,j})/3$; $r_{i,j}$ 为样本 i 和 j 之间的投影距离, $r_{i,j} = |z(i) - z(j)|$, $u(R - r_{i,j})$ 为单位阶跃函数, 当 $R < r_{i,j}$ 时函数值为 0, 否则为 1。

由以上已知条件即可求得一维投影目标函数:

$$Q(\alpha) = S_z \times D_z \quad (6)$$

(3) 投影目标函数的优化

当评价指标值的样本集确定时, 投影目标函数 $Q(\alpha)$ 随着且仅随着 α 的变化而改变, 因此, 通过投影目标函数最大化处理来求目标函数的近似最佳投影方向。遗传算法(GA)是模拟生物的遗传和进化过程的一种自适应、自组织的全局优化搜索算法, 其包括选择、交叉、变异等过程^[15], 通过对遗传算法在交叉变异使用随机策略, 并多次参数调整后, 确定初始种群为 60, 交叉概率为 0.85, 变异概率为 0.08, 迭代次数为 600 等参数后运行程序即可求得如下式所示具有等式和不等式的高维函数 $Q(\alpha)$ 的近似最佳投影向量和系数。

$$Q(\alpha) = \max(S_z \times D_z)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n \alpha_j^2 = 1, \quad -1 \leq \alpha_j \leq 1 \quad (7)$$

2 模型应用实例

采用编程技术对所建模型进行程序化, 利用文献[19]中的指标判定方法对正向指标和逆向指标进行检验和判定: 数据归一化处理之后数值完全一样的指标 (X_6, X_7) 权重相等, 假定逆向指标 (X_2, X_3, X_5, X_6, X_7) 的权重为负值, 结果符合文献[19]的定理和推理, 表明模型采用正确的约束条件和优化算法, 具有可靠性。

瓦斯抽采达标分级评价模型流程图如图 1 所示。

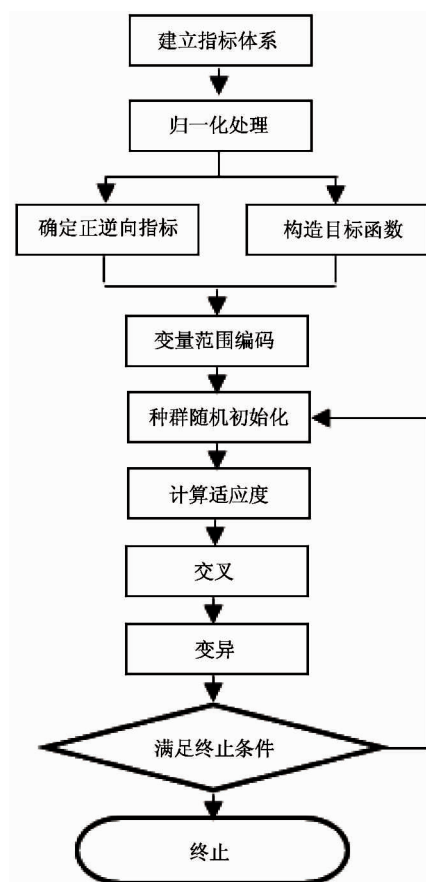


图 1 评价流程图

通过对评价指标和数据进行正向归一化处理、目标函数优化等处理, 最终求得瓦斯抽采达标评价和分级指标的权重: $\vec{\alpha} = (0.351, 0.192, 0.189, 0.490, 0.483, 0.247, 0.247, 0.457)$ 代入式(3)中即可求得对应的投影值:

$$\begin{aligned} z(i) = & 0.351 \times x_{i,1} + 0.192 \times x_{i,2} + 0.189 \times x_{i,3} \\ & 0.490 \times x_{i,4} + 0.483 \times x_{i,5} + 0.247 \times x_{i,6} \\ & + 0.247 \times x_{i,7} + 0.457 \times x_{i,8} \end{aligned}$$

$z(i)$ 所对应的投影值散点图, 如图 2(a) 所示, 图中的等级值对应分级标准中的等级。对图 2(a) 中的数值进行线性插值即可得到如图 2(b) 所示投影值散点图。

由散点图可观察出模型的分级明显, 图中各等级对应的投影端点值如表 2 所示。

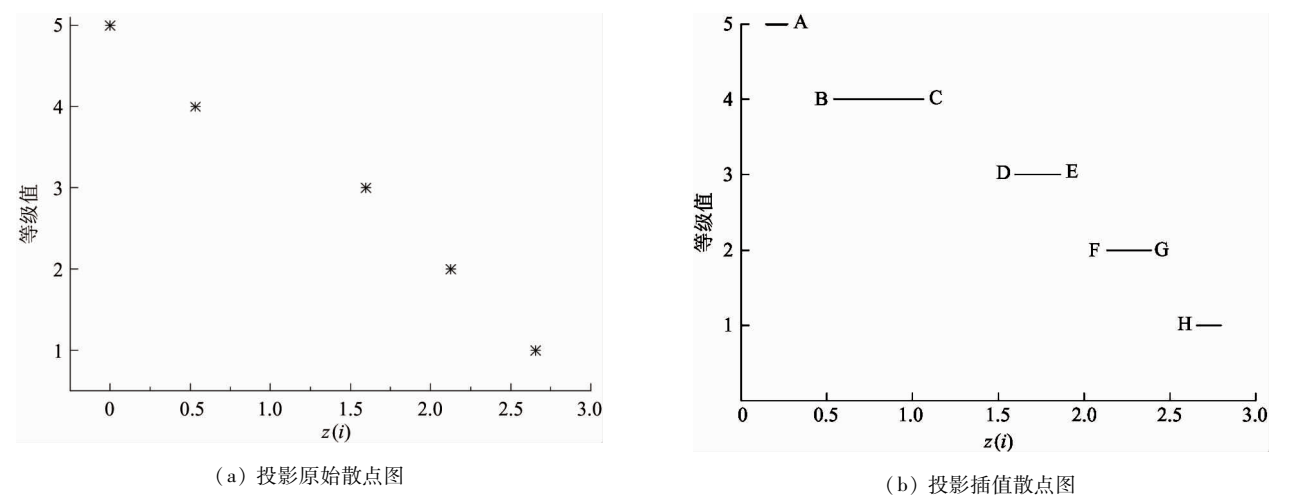


图 2 投影值散点图

表 2 投影端点值				
等级	左端点符号	投影值	右端点符号	投影值
1(Ⅰ)	H	2.66	—	—
2(Ⅱ)	F	2.12	G	2.39
3(Ⅲ)	D	1.60	E	1.86
4(Ⅳ)	B	0.53	C	1.06
5(Ⅴ)	—	—	A	0.266

$$y(i) = \begin{cases} -3.77 \times z(i) + 6 & 0.266 < z(i) < 0.531 \\ -1.88 \times z(i) + 6 & 1.06 < z(i) < 1.60 \\ -3.78 \times z(i) + 10 & 1.86 < z(i) < 2.12 \\ -3.77 \times z(i) + 11 & 2.39 \leq z(i) \leq 2.66 \end{cases} \quad (9)$$

取两个不同试验矿井进行瓦斯抽采达标评价和分级,其指标测量数值如表 3 所示。

工作面 A 所在的矿井瓦斯绝对涌出量为 61.82m³/min,相对瓦斯涌出量7.35m³/t;工作面瓦斯含量为11.31m³/t,煤层残余瓦斯压力为0.399MPa,煤层的透气性系数为0.0021~0.0795m²/(MPa²·d);工作面 B 所在的矿井绝对瓦斯涌出量为 98.94m³/min,相对瓦斯涌出量为9.82m³/t;工作面原始瓦斯含量为 12.73m³/t,残余瓦斯压力为 0.71MPa,煤层的透气性系数为4.0076~7.9727m²/(MPa²·d)。

设等级值为 $y(i)$, 则由表 2 和图 2 可知:

$$y(i) = \begin{cases} 1 & 2.66 \leq z(i) \\ 2 & 2.12 \leq z(i) \leq 2.39 \\ 3 & 1.60 \leq z(i) \leq 1.86 \\ 4 & 0.53 \leq z(i) \leq 1.06 \\ 5 & z(i) \leq 0.266 \end{cases} \quad (8)$$

对图 2(b)中的 A-B,C-D,E-F,G-H 各段进行线性回归处理可得:

表 3 试验矿井评价指标值								
矿井序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
A	80	3.7	0.399	70	3	3.2	0.4	77.1
B	85	7.56	0.71	25	6	4	0.98	39.9

利用式(1)和(2)对表 3 中的数值进行无量纲归一化处理,可求得矿井 A 的投影值 $z(A) = 2.21$, 矿井 B 的投影值 $z(B) = 1.1$,将 $z(A)$ 和 $z(B)$ 分别代入式(8)和(9)中求得 A 和 B 各自的等级值,分

别为 2 和 3.93,由此判定矿井 A 和 B 的达标等级分别为Ⅱ级和Ⅲ级。通过生产现场的对比,矿井 A 为瓦斯突出矿井,矿井 B 为高瓦斯突出矿井,两个矿井在瓦斯抽采达标评价报告中均显示为达标,但矿

井 B 需要加强瓦斯抽采管理和抽采强度,以降低发生瓦斯事故的概率,所建模型评价得出的结果与现场实际情况相匹配。

文献[11]使用的 AHP-FCE 方法进行瓦斯抽采达标评价需要有丰富现场工作经验的专家进行评分,在评分过程中难免有人为主观因素的存在,导致评价结果不稳定,难以确定评价的最终抽采达标效果。在使用其他评价方法进行瓦斯抽采达标评价时一般仅能判定瓦斯抽采达标的等级,而无法完全反映所处抽采达标等级的程度,难以找出评价不达标的原因及达标所存在不足之处,而使用瓦斯抽采达标遗传算法投影寻踪分级评价模型不仅可以判断达标等级,也能反映所处等级的程度,使评价结果更为准确、可靠,同时为瓦斯抽采技术和管理方面的改进提供了部分理论依据,基本可以满足高突矿井瓦斯抽采达标评价的工程需求。

3 结 论

(1)在对瓦斯抽采达标评价影响因素分析的基础之上,建立了瓦斯抽采达标评价的新方法——GAPP 分级评价法,并利用 GA 经典算法对评价指标进行了权重最佳投影向量的求解,对目标函数求解进行了相应的优化。

(2)利用投影寻踪法将 12 个指标数据投影到 1 维子空间,找到可以反映测试数据特征的投影,从而分析了 12 个指标数据,通过数据归一化处理使评价的结果不受指标之间的影响,建立了指标值与评价等级之间的关系,降低了多影响因素瓦斯抽采达标评价体系受人为主观因素和外界变化的影响。

(3)通过理论分析和案例验证所建模型的评价过程简捷而结果可靠,可以对瓦斯抽采达标及其等级程度进行评价。通过等级程度体现出达标与不达标程度,从而采取相应措施,从最大程度上降低事故发生的可能性。

(4)遗传投影寻踪瓦斯抽采分级达标评价的精确度很大程度上体现在评价分级标准的准确性,在实际应用过程中,针对不同矿井生产条件和评价条件的不同,适当增加评价样本以修正指标分级标准,

从而使评价的精确性进一步得到提高,得到的评价结果更为可靠。

参考文献

- [1] 林柏泉, 张建国. 矿井瓦斯抽放理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007
- [2] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论及煤与瓦斯共采技术体系[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 1-8
- [3] 程远平, 付建华, 俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 127-139
- [4] 李润求, 施式亮, 念其锋, 等. 近 10 年我国煤矿瓦斯灾害事故规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(9): 143-151
- [5] 张景立. 突出危险采煤工作面消突试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(3): 38-40
- [6] 孙鑫, 徐扬, 林柏泉, 等. 煤与瓦斯突出影响因素评价分析的模糊层次分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(10): 145-149
- [7] 王彦波, 谢贤平, 李锦峰, 等. 基于 FAHP 的煤矿瓦斯治理综合评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(11): 101-106
- [8] 周福宝, 王鑫鑫, 夏同强. 瓦斯安全抽采及其建模[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1659-1666
- [9] 董贺, 王佰顺, 李春亭. 穿层预抽钻孔倾角与煤层气抽采效果关系的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(2): 99-104
- [10] 梁冰, 秦冰, 孙福玉, 等. 煤与瓦斯共采评价指标体系及评价模型的应用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 728-735
- [11] 申健, 李雪冰. 瓦斯抽采达标评价 AHP-FCE 模型及应用[J]. 辽宁工程技术大学(自然科学版), 2015, 34(5): 578-583
- [12] 董洪凯. 高突矿井瓦斯抽采防突评价体系的构建及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(2): 84-88
- [13] 付强, 金菊良, 门宝辉, 等. 基于 RAGA 的 PPE 模型在土壤质量等级评价中的应用研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(5): 51-54
- [14] 付强, 付红, 王立坤. 基于加速遗传算法的投影寻踪模型在水质评价中的应用研究[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 236-239
- [15] 付强, 金菊良, 门宝辉, 等. 基于实码加速遗传算法的投影寻踪分类模型在水稻灌溉制度优化中的应用

[J]. 水力学报, 2002, (10): 39-45

[16] 辜智慧, 王娟, 葛怡, 等. 区域建筑群台风灾害综合脆弱性评估方法研究:以广东省为例[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(2): 108-113

[17] 马立新, 朱润, 周小波. 电力用户的智能能效分析及评级新方法[J]. 控制工程, 2016, 23(4): 474-477

[18] 高科, 刘剑, 刘玉娇. 回采工作面瓦斯涌出量遗传投影寻踪回归预测[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(3): 96-101

[19] 楼文高, 乔龙. 投影寻踪分类建模理论的新探索与实证研究[J]. 数理统计与管理, 2015, 34(1): 47-58

[20] 楼文高, 熊聘, 乔龙. 投影寻踪分类模型建模中存在的问题及其改进[J]. 科技管理研究, 2014, (6): 166-171

[21] 熊聘, 楼文高. 投影寻踪建模中关键参数合理值的确定与分析[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(9): 50-55

Research and application of classification evaluation
model for gas extraction to standard

Xu Tingting^{***}, Huang De^{***}

(^{*} School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105)

(^{**} Key Laboratory of Mine Thermo-motive Disaster and Prevention, Ministry of Education, Huludao 125105)

Abstract

In order to solve the gas drainage standard evaluation system’s complexity, human interference and other issues, using projection pursuit (PP) dimension reduction idea, the high-dimensional index data is projected to one dimensional subspace; genetic algorithm is used to find approximate optimal projection vector; A hierarchical evaluation model of gas extraction criteria based on genetic algorithm projection pursuit (GAPP) is established. Evaluating and grading whether the gas extraction is up to standard is fast and accurate. Model in two different mines are carried out. The practical application and the analysis results show that using genetic projection pursuit model for gas drainage in the evaluation standards can also be evaluated by standard grade (grade II and III respectively) at the same time, the value of 2 and 3.93 grades available to reflect the degree of evaluation results, in accordance with practical production that confirmed the accuracy and reliability of the evaluation model.

Key words: gas drainage, gas emission rate, grading evaluation, genetic algorithm, projection pursuit (PP)